山西北部极端降水时空演变规律及与大气环流因子的响应

蔡 霞[1]， 梁桂花[2]， 张冬峰[3]， 蔡 琳[4]， 白 樱[5]， 李锐锋[6]

（1. 山西省朔州市气象局，山西 朔州 036002；2. 山西省朔州市朔城区气象局，山西 朔州 036002；3. 山西省气候中心，山西 太原 030006；4. 山东省菏泽学院，山东 菏泽 274000；5. 河北省邯郸市气象局，河北 邯郸 056001；6. 山西省朔州市平鲁区气象局，山西 朔州 036002）

摘 要：基于山西北部28个国家气象站点，1972—2020年逐日降水资料，选用8个极端降水指数，采用线性回归、Pearson相关分析、连续小波和交叉小波变换分析等方法，研究了山西北部极端降水的时空变化及其与大气环流因子的相关性和周期特征。结果表明：(1) 在时间上，山西北部8个极端降水指数都是在20世纪70年代后期和21世纪00年代后期到10年代，年总降水量(PRCPTOT)、中雨以上日数(R10mm)、强降水量(R95P)、极强降水量(R99P)、1 d最大降水量(Rx1day)、5 d最大降水量(Rx5day)均增多，日降水强度(SDII)显著增强，持续湿期日数(CWD)也略有增多。整个20世纪80年代降水异常偏少。(2) 在空间上，极端降水指数呈从东北向西南地区逐步增加的态势。从站点趋势变化来分析，大多数站点的极端降水指数呈上升趋势，其中，上升趋势最显著的站点均位于忻州市境内西南部。朔州市境内和忻州市东南部站点PRCPTOT和SDII都呈增加趋势，但CWD则呈减少趋势，由此说明朔州市境内和忻州市东南部地区发生极端降水事件的概率较大。(3) 通过小波变换分析发现，1990—2020年山西北部极端降水指数表现出约4 a左右的周期特征。在选取的大气环流指数中，北大西洋涛动指数(NAO)对山西北部极端降水影响最明显，NAO越大，PRCPTOT、R10mm、R95p、R99p、Rx1day、Rx5day、SDII则越小，同时CWD也越少，山西北部产生少雨干旱的几率较大，反之，易发生多雨、洪涝现象。研究结果可为山西北部气象灾害的防御提供科学理论依据。

关 键 词：极端降水指数；时空分布；大气环流异常因子；小波分析；山西北部

文章编号：1000－6060(2024)03－0391－12(0391～0402)

IPCC第六次评估报告指出，自从20世纪80年代以来，全球陆地平均降水速率加速增长，高温热浪、干旱、极端强降水事件频率和强度持续显著增强，未来有趋于严重的态势[1]。

近年来，有学者研究了全球的降水事件，证实全球各地区降水日数和极端降水都显著增多，其中北美洲区域极端降水量呈上升趋势[2]，南美洲区域极端降水频率显著增强[3]，亚洲的大部分区域极端降水频次和强度都表现出增多增强的态势[4-5]。还有学者对影响极端降水的环流因子进行了深入研究[6]，发现厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)[7]、印度洋偶极子、北大西洋涛动(NAO)、太平洋年际振荡(PDO)[8-10]、热带太平洋海温[11]、东亚夏季风[12]以及西太平洋副热带高压[12-13]等大气环流异常与极端降水事件的发生关系密切。张勇等[14]研究发现NAO不仅在年代际上显现显著的周期震荡特征，而且与长江中下游

收稿日期：2023-08-18； **修订日期**：2023-10-09
基金项目：山西省气象局课题(SXKMSQH20236329)；山西省重点研发计划项目(201803D31219)；菏泽学院科研基金计划项目(扶贫专项)(XY18FP08)资助
作者简介：蔡霞(1975-)，女，高级工程师，主要从事气候变化研究、农业气象服务、气象灾害等研究. E-mail: caixiaqx@sina.com
通讯作者：张冬峰(1969-)，女，博士，正研级高工，主要从事气候和气候变化等研究. E-mail: minczdf@hotmail.com

地区极端降水响应关系很好,吴舒祺等[15]指出大气涛动与长江中下游地区极端降水存在显著的共振周期,不同时频域上差异明显,说明外部驱动力能够影响极端降水的变化,大尺度的气候因子可以作为其中的一个重要原因。近些年,越来越多的学者对极端降水的周期特征进行了相关研究[16-21],邹磊等[20]采用连续小波变换及交叉小波等方法,讨论了渭河流域极端降水指数的周期变换特征及其与大气环流因子的响应。丁莹莹等[21]采用小波相干分析等方法,研究了关中平原极端降水指数与南方涛动(SIO)的位相关系及局部相关程度,也有部分学者针对山西全省极端降水指数开展了相关研究[22-23],但对于山西北部极端降水影响机制的研究尚少。山西历来"十年九旱"[24-25],尤其是1990年代之后,伴随全球变暖加速,山西干旱日趋严重,也对农业生产造成重大影响[26]。山西北部地区自然降水更少,大多数农作物产量都依赖天气气候条件,因此很有必要针对山西北部极端降水指数与大气环流指数之间的关系进行更深层次的探讨。本文详细研究了山西北部地区极端降水指数的时空变化和周期震荡特征及其与大气环流因子之间的响应,为山西北部极端降水事件的预测和农业气象服务提供理论依据,为政府部门防治旱涝灾害提供科学支撑。

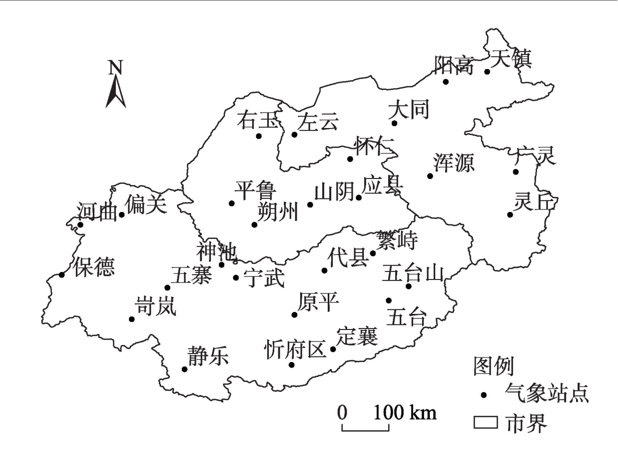
1 数据与方法

1.1 研究区概况

山西北部地区(111.08°~114.26°E,38.39°~40.37°N)自北向南包括大同、朔州、忻州3个地级市,面积约为4.99×10^4 km^2,海拔759.4~2208.3 m。地形复杂多变,以南部恒山、北部洪涛山为界,东邻太行山,西靠吕梁山,山脉之间有大同盆地和忻州盆地,属温带寒冷半干旱气候。

1.2 数据来源

1972—2020年逐日降水资料源自山西北部28个国家气象站点(图1)。利用RClimate1.0软件对逐日降水数据进行计算和质量控制检验得到极端降水指数。为进一步研究对山西北部地区极端降水的大气环流影响因子,选择与极端降水指数关系较为密切的9种大气环流因子,包括南方涛动指数(SOI)、北太平洋遥相关指数(NP)、北大西洋涛动指数(NAO)、北极涛动指数(AO)、大西洋年际振荡指数(AMO)、西太平洋遥相关型指数(WP)、太平洋年代际振荡指数(PDO)、亚洲区极涡面积指数和太阳黑子(SN),数据来源于国家气候中心\气候监测(http://cmdp.ncc-cma.net/cn/monitoring.htm)。



注:该图基于山西省自然资源厅标准地图服务网站下载的审图号为晋S(2021)005号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 山西北部气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in northern Shanxi

1.3 研究方法

根据山西北部的气候特征,选取了世界气象组织(World Meteorological Organization,WMO)以及气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)(http://etccdi.pacificclimate.org/)推荐的核心指数中的8种极端降水指数,包括年总降水量(PRCPTOT)、中雨以上日数(R10mm)、强降水量(R95P)、极强降水量(R99P)、1 d最大降水量(Rx1day)、5 d最大降水量(Rx5day)、日降水强度(SDII)、持续湿期日数(CWD)(表1)。

采用线性回归法分析了极端降水指数的气候变化趋势[27];通过ArcGIS反距离权重插值法[28]绘制极端降水的空间趋势分布图;应用皮尔逊相关系数法、连续小波变换和交叉小波等方法[20-21,29-33]分析了极端降水指数与大气环流因子之间的相关性和周期性特征。

2 结果与分析

2.1 山西北部极端降水指数时空演变特征

2.1.1 极端降水指数时间变化特征 1972—2020年山西北部极端降水指数PRCPTOT、R10mm、SDII、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day分别以8.022 mm·(10a)$^{-1}$、

表1　极端降水指数及定义

Tab. 1　Extreme precipitation indices and definitions

指数	英文缩写	指数定义	单位
日降水强度	SDII	年降水总量与湿日日数(日降水量≥1 mm)的比值	$mm \cdot d^{-1}$
年总降水量	PRCPTOT	日降水量≥1 mm年累计降水量	mm
1 d最大降水量	Rx1day	每月最大1 d降水量	mm
5 d最大降水量	Rx5day	每月连续5 d最大降水量	mm
强降水量	R95p	日降水量>95%分位值的年累计降水量	mm
极强降水量	R99p	日降水量>99%分位值的年累计降水量	mm
中雨以上日数	R10mm	日降水量≥10 mm的日数	d
持续湿期日数	CWD	日降水量≥1 mm的最大持续日数	d

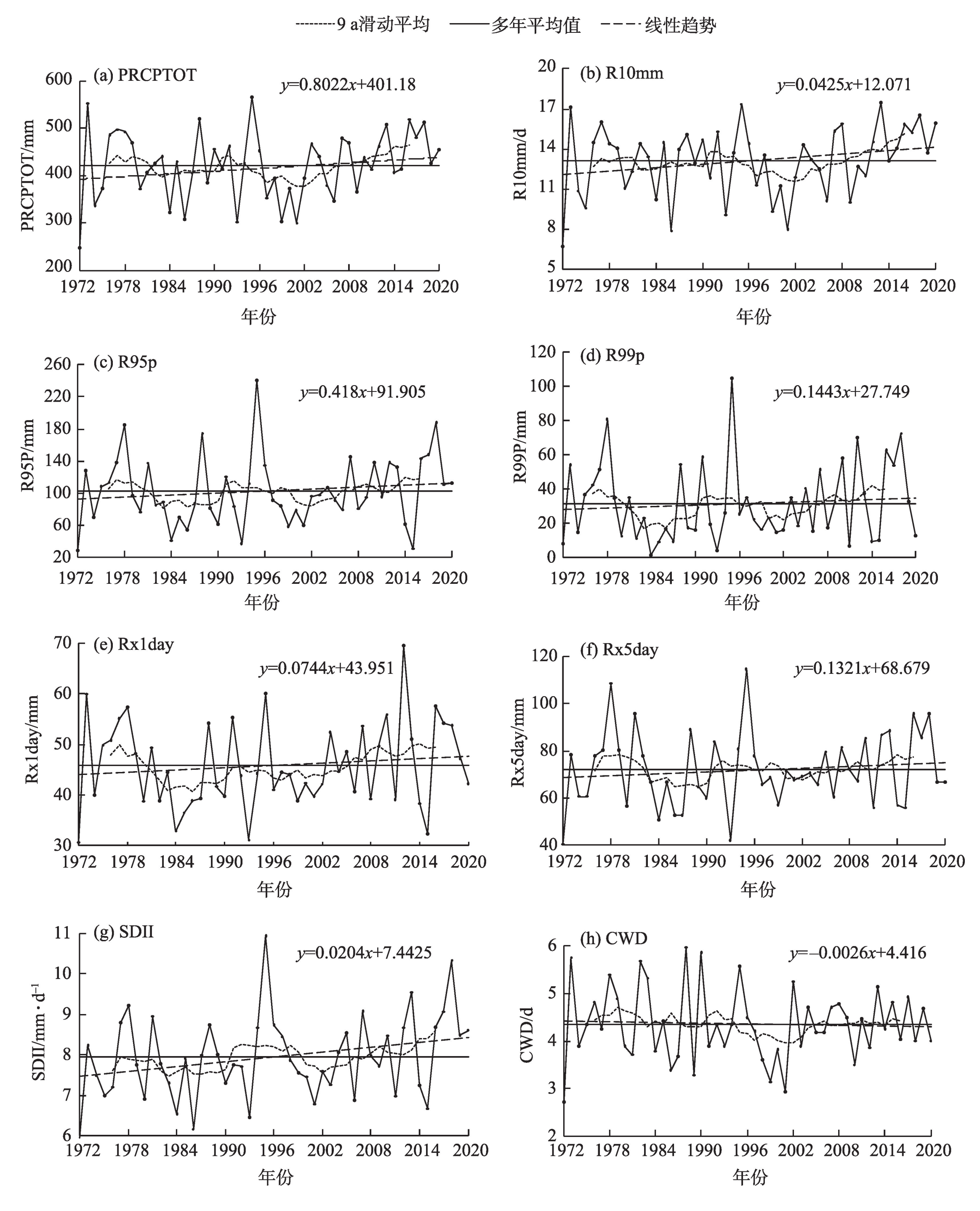
0.425 $d \cdot (10a)^{-1}$、0.204 $mm \cdot (10a)^{-1}$、4.18 $mm \cdot (10a)^{-1}$、1.443 $mm \cdot (10a)^{-1}$、0.744 $mm \cdot (10a)^{-1}$、1.321 $mm \cdot (10a)^{-1}$的速率增加，SDII通过了0.05的显著性水平检验，其他指数的上升趋势都不显著，说明SDII有显著增强的趋势，但CWD指数以0.026 $d \cdot (10a)^{-1}$的速率减少(图2)。

其中，PRCPTOT多年平均值为421.2 mm，降水最多年份出现在1995年(565.2 mm)，最少年份出现在1972年(247.4 mm)；R10mm多年平均值为13.1 d，R10mm最多年份出现在2013年(17.5 d)，最少年份出现在1972年(6.8 d)。通过9 a滑动平均曲线来看，PRCPTOT和R10mm变化趋势基本一致，都是在20世纪70年代后期和90年代前期以及21世纪00年代后期到10年代，位于多年平均值之上，降水偏多，整个20世纪80年代以及90年代中期一直到21世纪00年代中期，处于多年平均值之下，降水偏少。

R95P和R99P多年平均值分别为102.4 mm和31.4 mm，最大值均出现于1995年(分别为240.0 mm和105.0 mm)。Rx5day多年平均值为72.0 mm，年最大5 d降水量发生在1995年(114.5 mm)，年最小5 d降水量发生在1972年(40.4 mm)。从9 a滑动平均曲线分析，R95P、R99P和Rx5day波动趋势一致，均在20世纪70年代后期、90年代以及21世纪00年代中后期到10年代高于多年平均值，属多雨期，20世纪80年代和21世纪00年代前期低于多年平均值，属少雨期。Rx1day多年平均值为45.8 mm，年最大1 d降水量发生在2012年(69.6 mm)，年最小1 d降水量发生在1972年(30.7 mm)。9 a滑动平均曲线显示，Rx1day在20世纪70年代后期和21世纪00年代中后期到10年代，高于多年平均值，属多雨期，从20世纪80年代一直延续到21世纪00年代中期均低于多年平均值。SDII多年平均值为8.0 mm，SDII最大值发生在1995年(10.9 mm)，最小值发生在1972年(5.9 mm)。从9 a滑动平均曲线可知，20世纪70年代中后期持续到整个80年代和21世纪00年代前期，SDII均弱于多年平均值，处于多年平均值之下，20世纪90年代和21世纪00年代中后期到10年代，SDII均强于多年平均值，位于多年平均值上方。CWD多年平均值为4.4 d，CWD最多出现在1988年(6.0 d)，最少出现在1972年(2.7 d)。9 a滑动平均曲线显示，20世纪70年代到80年代后期CWD位于多年平均值之上，80年代后期到90年代后期在多年平均值上下波动，90年代后期到21世纪00年代后期，位于多年平均值下方，21世纪00年代后期到10年代之后略多于多年平均值。

通过以上分析发现，PRCPTOT、R10mm、SDII、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day和CWD 8个极端降水指数在20世纪70年代后期和21世纪00年代后期到10年代，PRCPTOT、R10mm、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day均增多，SDII显著增强，CWD也略有增多。整个20世纪80年代降水异常偏少。

2.1.2　极端强降水指数空间分布特征　由图3所示，8个极端降水指数空间分布均呈现出从东北向西南增多，SDII最大值出现在五台站，其余7个极端降水指数的最大值都出现在五台山站。PRCPTOT介于358.5~712.3 mm之间，最小值出现在山阴县，为358.5 mm。R10mm介于11.1~21.9 d之间，最小值出现在山阴县。R95p和R99p分别介于82.3~178.2 mm和21.3~58.4 mm之间，最小值均出现在应县。Rx1day和Rx5day分别介于36.9~59.9 mm和58.6~101.7 mm之间，最小值均出现在应县。SDII介于7.2~9.1 mm之间，最小值出现在应县。CWD介于3.8~5.8 d之



注：PRCPTOT、R10mm、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day、SDII、CWD分别为年总降水量、中雨以上日数、强降水量、极强降水量、1 d最大降水量、5 d最大降水量、日降水强度、持续湿期日数。下同。

图2 山西北部极端降水指数变化趋势

Fig. 2 Change trends of extreme precipitation indices in northern Shanxi

间，最小值出现在浑源县。

从极端降水指数站点趋势分析（表2）来看，PRCPTOT和R10mm呈上升趋势的站点分别占82.1%和89.3%。阳高、天镇、浑源、广灵、五台山站PRCPTOT均呈现下降趋势，无显著下降站点，下降速率最大的站点为五台山站，为20.15 mm·(10a)$^{-1}$，其他站点呈上升趋势，其中五寨站上升速率最显著，为19.3 mm·(10a)$^{-1}$，神池站次之，为17.7 mm·(10a)$^{-1}$，2个站点均通过了α=0.05的显著性检验。阳高、浑源、五台山站R10mm分别以0.31 d·(10a)$^{-1}$、

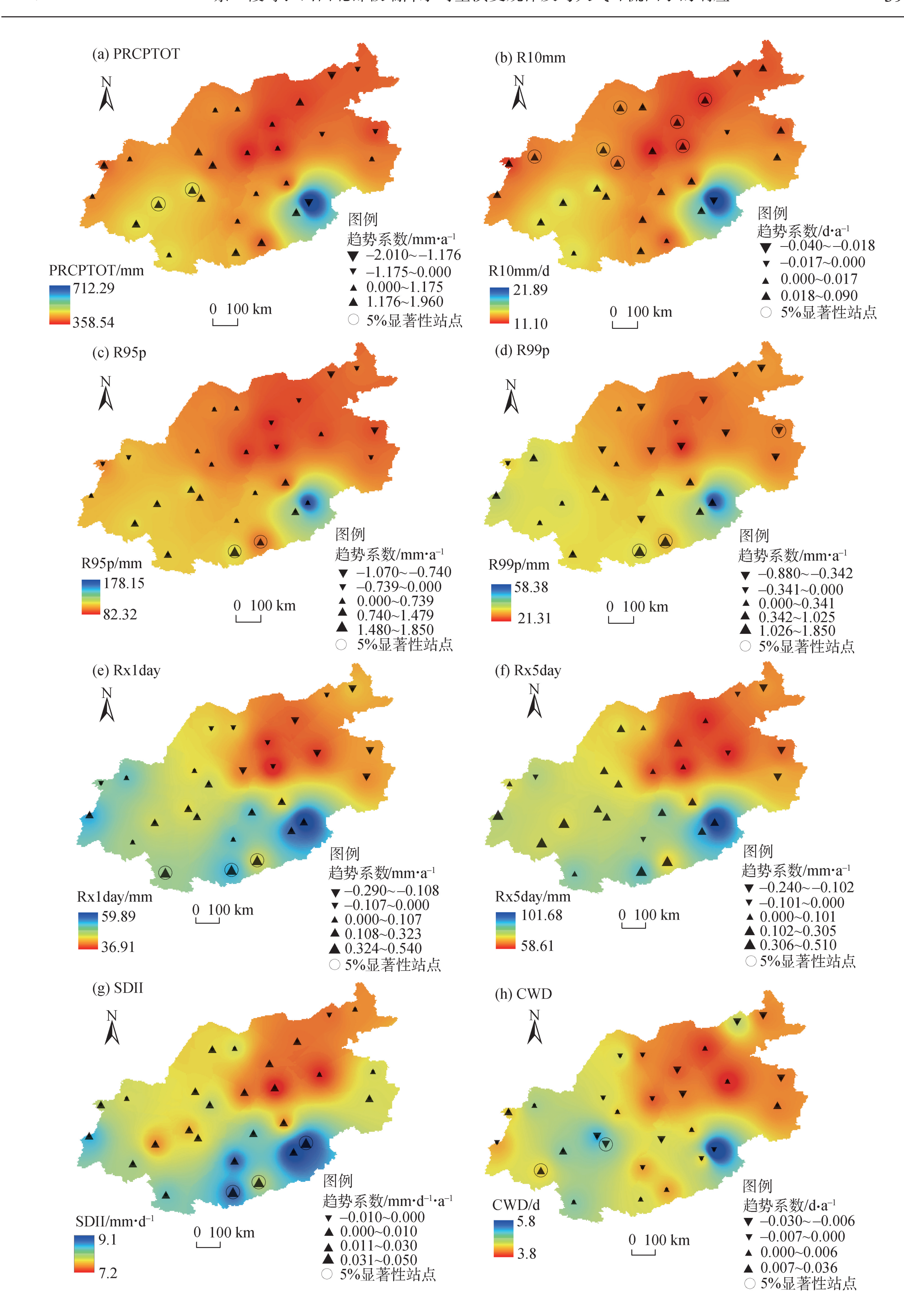


图3　山西北部地区极端降水指数空间分布及趋势变化特征

Fig. 3　Spatial distributions and trends of extreme precipitation indices in northern Shanxi

表2 极端降水指数趋势分析站点统计

Tab. 2 Site statistics of extreme precipitation index trend analysis

指数	上升趋势站点个数	显著上升站点个数	上升趋势站点占比/%	下降趋势站点个数	显著下降站点个数	下降趋势站点占比/%
PRCPTOT	23	2	82.1	5	0	17.9
Rx1day	16	3	57.1	12	0	42.9
Rx5day	21	0	75.0	7	0	25.0
R10mm	25	7	89.3	3	0	10.7
R95p	19	2	67.9	9	0	32.1
R99p	15	2	53.6	13	1	46.4
SDII	27	3	96.4	1	0	3.6
CWD	12	1	42.9	16	1	57.1

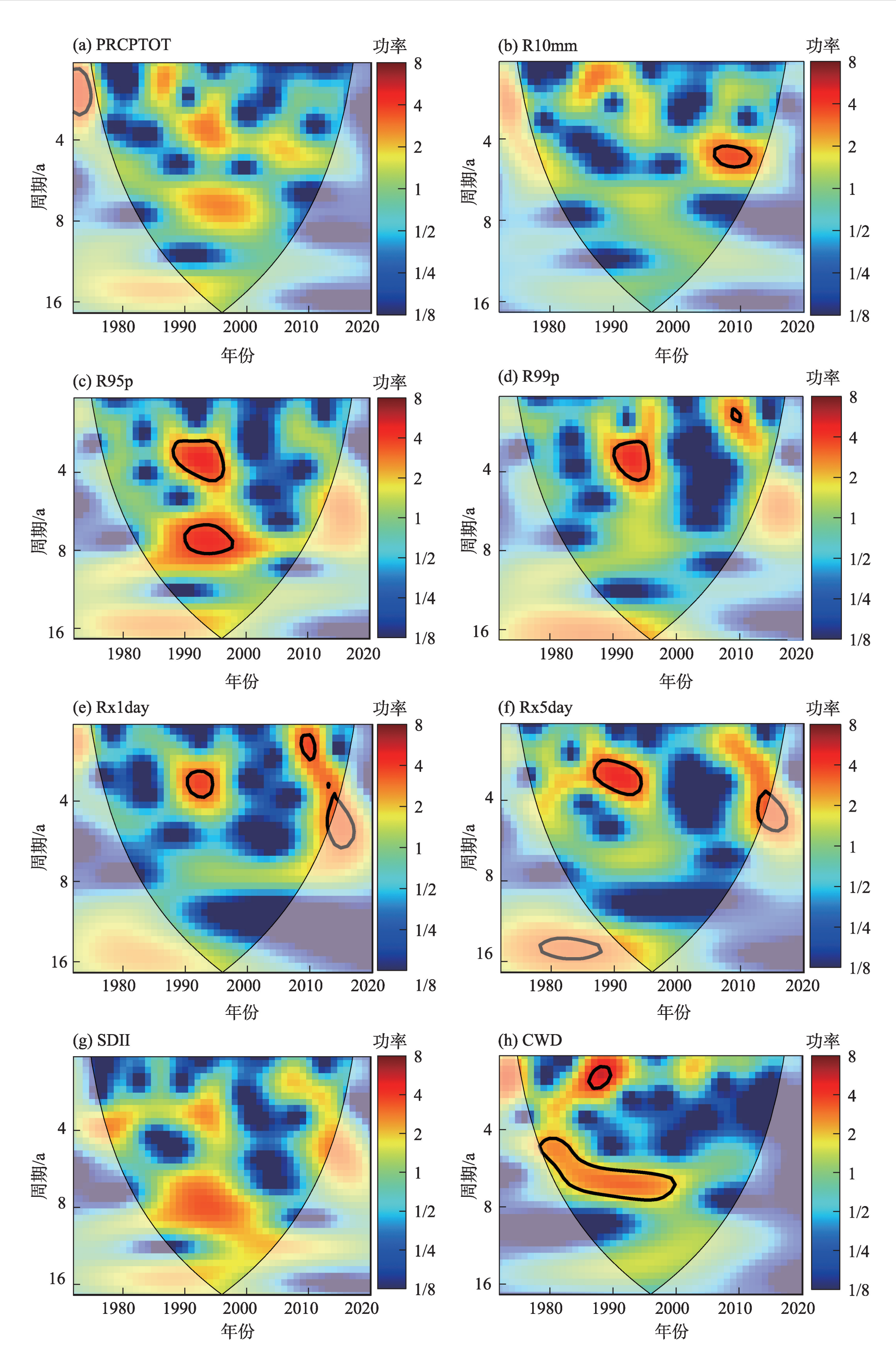
0.02 d·$(10a)^{-1}$和0.38 d·$(10a)^{-1}$的速率下降，其他站点均呈上升趋势，其中大同、朔城区、应县、平鲁、右玉、偏关6个站点均通过了α=0.05的显著性检验，怀仁通过了α=0.01的显著性检验，朔城区站上升速率最显著，为0.86 d·$(10a)^{-1}$。Rx1day呈上升趋势的站点占57.1%，忻府区、定襄2个站点均通过了α=0.01的显著性检验，静乐站通过了α=0.05的显著性检验，定襄站上升速率最显著，为5.41 mm·$(10a)^{-1}$，下降趋势的站点占42.9%，无显著下降站点，广灵站下降速率最大，为2.87 mm·$(10a)^{-1}$。Rx5day呈上升趋势的站点占75.0%，无显著上升和显著下降的站点，定襄站上升速率最大，为5.08 mm·$(10a)^{-1}$，天镇站下降速率最大，为2.38 mm·$(10a)^{-1}$。R95p和R99p呈上升趋势的站点分别占67.9%和53.6%，显著上升的站点均位于忻府区和定襄站，2个站点分别通过了α=0.05和α=0.01的显著性检验，R95p无显著下降站点，广灵站下降速率最大，为10.74 mm·$(10a)^{-1}$，R99p显著下降的站点位于广灵县，为8.77 mm·$(10a)^{-1}$，通过了α=0.05的显著性检验。CWD呈下降趋势的站点占57.1%，宁武县下降速率最显著，为0.29 d·$(10a)^{-1}$，通过了α=0.05的显著性检验，岢岚县上升速率最显著，为0.36 d·$(10a)^{-1}$，通过了α=0.01的显著性检验。SDII除阳高站呈下降趋势外，其余27个站点均呈上升趋势，其中显著上升的站点位于忻府区、五台山和定襄站，分别通过了α=0.01和α=0.05的显著性检验，五台山站上升速率最显著，为0.46 mm·$(10a)^{-1}$。

综上所述，山西北部8个极端降水指数空间分布均表现出从东北向西南地区逐步增加。从站点趋势变化来分析，大多数站点的极端降水指数呈上升趋势，其中上升趋势最显著的站点均位于忻州市境内西南部。朔州市境内和忻州市东南部站点PRCPTOT和SDII都呈增加趋势，但CWD则呈减少趋势，由此说明朔州市境内和忻州市东南部地区发生极端降水事件的概率较大。蔡霞等[34]研究指出1972—2020年近49 a来山西北部极端强降水日数和暴雨日数(极强降水日数)均呈现小幅上升趋势，极端强降水日数的各年代际差异较明显，其中西南部站点从21世纪10年代开始明显多于东北部站点。暴雨日数(极强降水日数)各年代际空间分布都表现出从东北部向西南部增加的特点。与本文探讨的8个极端降水指数空间分布及趋势变化特征所得结论一致。

2.2 极端降水指数的周期特征

连续小波变换能揭示极端降水指数的时序变化特征。由山西北部极端降水连续小波变换功率谱(图4)可以看出，SDII周期特征未达到置信水平为95%的红噪声检验，其他7个极端降水指数在通过95%的置信水平下，PRCPTOT存在2~3 a左右的显著周期，较强的能量发生在1972—1976年；R10mm在2005—2012年表现出4~5 a左右的周期震荡；R95P在1990—1995年和1991—1996年分别表现出2~4.5 a左右和7~8 a左右的周期震荡；R99P在1991—1996年表现出2~4.5 a左右的周期震荡；Rx1day在1990—1992、2019—2010、2010—2017年分别表现出2~4 a、1~1.5 a、4~6 a左右的周期震荡；Rx5day在1990—1995、2012—2018年分别表现出2~4 a、4~6 a左右的周期震荡；CWD在1980—1995年和1991—1993年分别表现出1~2 a和4.5~8 a左右的周期震荡。

综上所述，除SDII外，PRCPTOT、R10mm、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day和CWD都在近8 a内周期特



注：红色表示能量密度的高值；蓝色表示能量密度的低值；黑色细实线为小波边界效应影响锥曲线，曲线范围之外的功率谱因边界效应的影响而不作探讨；粗黑实线范围之内代表超过了置信水平为95%红色噪音标准谱的检验。下同。

图4　山西北部极端降水指数连续小波变换功率谱

Fig. 4　Continuous wavelet transform power spectrum of extreme precipitation indices in northern Shanxi

表3 极端降水指数与大气环流异常因子的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between extreme precipitation indices and abnormal factors of atmospheric circulation

类型	NAO	AO	WP	NP	SOI	AMO	SN	PDO	亚洲区极涡面积指数
PRCPTOT	−0.17	0.01	−0.08	0.04	0.07	0.23	−0.16	0.04	−0.21
Rx1day	−0.35**	−0.22	−0.14	−0.07	0.14	0.27*	−0.13	−0.16	−0.24*
Rx5day	−0.27*	−0.23	−0.17	0.13	0.09	0.22	−0.02	−0.04	−0.23
R10mm	−0.14	0.10	−0.08	0.02	−0.01	0.28*	0.18	0.09	0.27*
R95p	−0.28*	−0.23	−0.18	0.10	0.17	0.24*	−0.21	−0.05	−0.20
R99p	−0.28*	−0.28*	−0.15	0.11	0.09	0.19	−0.17	−0.06	−0.17
SDII	−0.30**	−0.15	−0.19	0.09	0.08	0.34**	−0.23	−0.01	−0.29**
CWD	0.06	0.13	−0.003	0.15	−0.05	−0.03	−0.03	0.07	−0.01

注:NAO、AO、WP、NP、SOI、AMO、SN、PDO分别为北大西洋涛动指数、北极涛动指数、西太平洋遥相关型指数、北太平洋遥相关指数、南方涛动指数、大西洋年际振荡指数、太阳黑子、太平洋年代际振荡指数。*、**分别表示在0.1、0.05水平上显著相关。

性显著,震荡周期约4 a左右。

2.3 极端降水对大气环流异常因子的响应

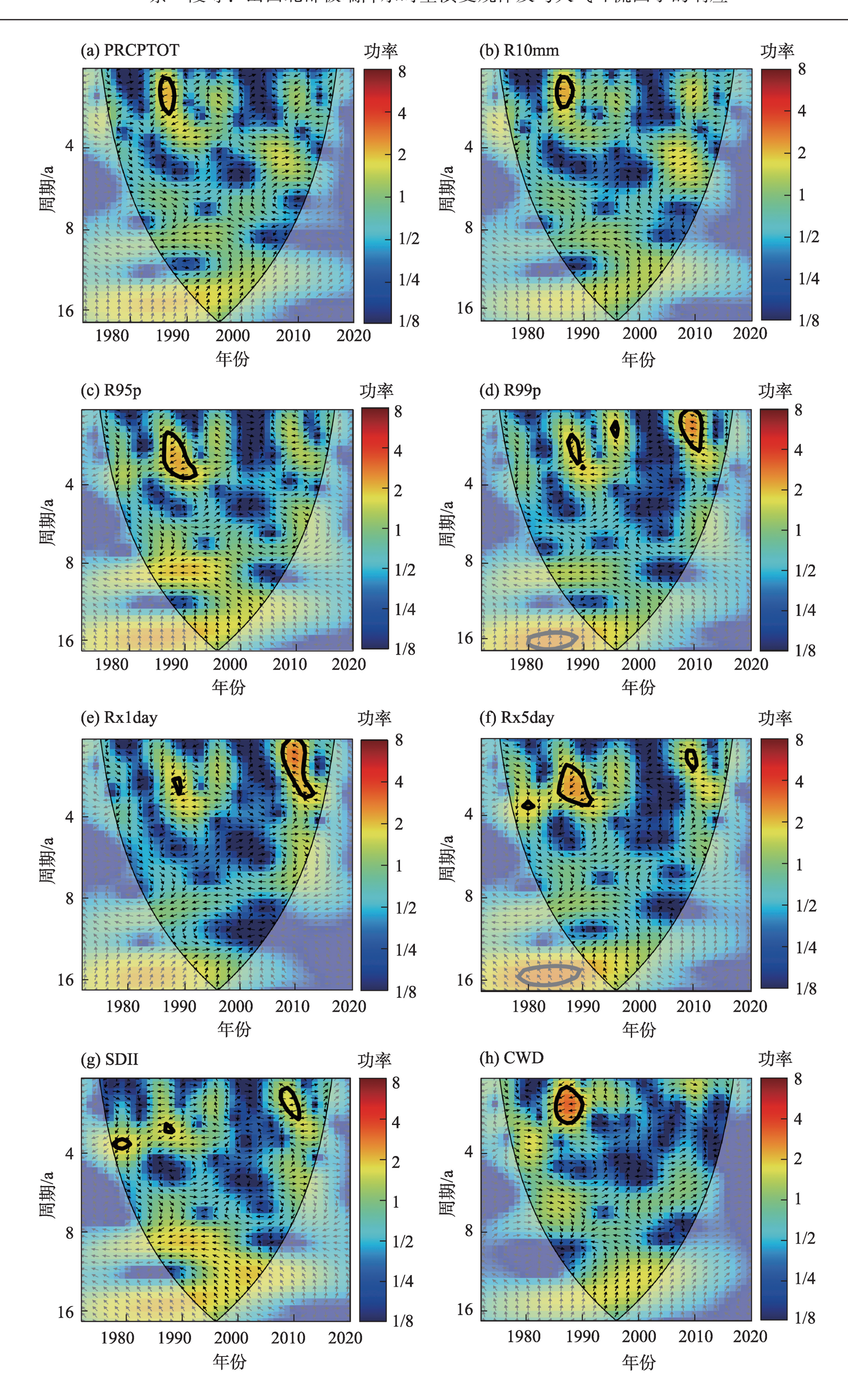
选取1972—2020年的大气环流的NAO、AO、AMO、SOI、PDO、NP、WP、SN和亚洲区极涡面积指数与同时间序列的8个极端降水指数进行相关系数计算(表3),发现NAO与Rx1day、Rx5day、R95P、R99P、SDII存在显著负相关,相关系数均通过了0.1的显著性检验,与Rx1day和SDII相关系数通过了0.05的显著性检验。AO因子与R99P存在显著负相关,相关系数通过了0.1的显著性检验。AMO因子与Rx1day、R10mm、R95P和SDII存在显著正相关,相关系数分别通过了0.1和0.05的显著性检验。亚洲区极涡面积指数与Rx1day和SDII存在显著负相关,相关系数分别通过了0.1和0.05的显著性检验,与R10mm存在显著正相关,相关系数通过了0.1的显著性检验。

由以上分析得出,NAO指数增大,Rx1day、Rx5day、R95P、R99P以及SDII都相应减少;AO指数越大,R99P越少;AMO指数增大,Rx1day、R10mm、R95P以及SDII都相应增多、增强;亚洲区极涡面积指数增大,Rx1day、SDII都减少,而R10mm却随之增多。

采用交叉小波进一步探讨极端降水指数与大气环流指数NAO两者间的时频变换关系和周期共同特征。交叉小波变换重点反映极端降水指数变化与NAO指数在时频域中高能量区和低能量区的相互影响关系(图5)。

PRCPTOT、R10mm与NAO的交叉小波功率谱相似,高能量区都集中在1985—1988年,存在1~2.5 a的共振周期(小波交叉功率谱相关系数通过了$\alpha=0.05$显著性水平下的红噪声检验),PRCPTOT与NAO,R10mm与NAO都呈负相位变化关系,说明PRCPTOT、R10mm与NAO的变化相反,即NAO值越大,PRCPTOT和R10mm越少(图5a~b)。交叉小波功率谱高能量区集中在1986—1992年,显示出1.5~4 a的共振周期,R95P与NAO呈负相位,且提前1~2个月(位相角方向左向下,位相差约为45°)(图5c)。高能量区集中在2008—2012年,存在1~3 a的共振周期,在此周期内R99P与NAO呈负位相,且滞后1~2个月(位相角方向左向上,位相差约为45°)(图5d)。高能量区集中在2008—2012年,存在1~3.5 a的共振周期,在该周期内Rx1day与NAO呈负位相,同时滞后1~2个月(位相角方向左向上,位相差约为45°)(图5e)。高能量区集中在1986—1990年,存在1.5~4.0 a的共振周期,此周期内Rx5day与NAO呈负位相,同时超前1~2个月(位相角方向左向下,位相差约为45°)(图5f)。高能量区集中在2008—2012年,存在1.5~2.0 a的共振周期,共振周期内SDII与NAO呈负位相(图5g)。高能量区集中在1984—1990年,存在1.5~3.0 a的共振周期,共振周期内CWD与NAO呈负位相(图5h)。

由以上分析得出,极端降水指数主要受NAO影响,NAO值越大,PRCPTOT、R10mm、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day和SDII则越小,同时CWD也越少。特别是在1990—2020年,约4 a左右的共振周期特征较鲜明,与本文研究极端降水指数的周期震荡变化特征结论相一致。



注：箭头的指向体现了极端降水指数与NAO的位相差；箭头方向从左指向右代表极端降水指数与NAO同相位，从右指向左代表反相位；箭头垂直向下代表极端降水指数的小波变换比NAO提前90°，垂直向上则代表极端降水指数比NAO滞后90°。

图5 山西北部极端降水指数与NAO交叉小波变换

Fig. 5 Cross wavelet transform of extreme precipitation indices and NAO in northern Shanxi

3 结 论

（1）山西北部极端降水指数PRCPTOT、R10mm、Rx1day、Rx5day、R95P、R99P、SDII和CWD 8个极端降水指数在20世纪70年代后期和21世纪00年代后期到10年代，PRCPTOT、R10mm、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day均增多，SDII显著增强，CWD也略有增多。整个20世纪80年代降水异常偏少。

（2）山西北部8个极端降水指数空间分布均表现出由东北向西南地区逐步增加。从站点趋势变化来分析，大多数站点的极端降水指数呈上升趋势，其中，上升趋势最显著的站点均位于忻州市境内西南部。朔州市境内和忻州市东南部站点PRCPTOT和SDII都呈增加趋势，但CWD则呈减少趋势，由此说明朔州市境内和忻州市东南部地区发生极端降水事件的概率较大。

（3）通过连续小波和交叉小波变换分析发现，1990—2020年山西北部极端降水指数存在约4 a左右的周期特征。NAO对山西北部极端降水指数有重要的影响作用，NAO值越大，PRCPTOT、R10mm、R95P、R99P、Rx1day、Rx5day、SDII则越小，同时CWD也越少，即山西北部产生少雨干旱的几率较大，反之，易发生多雨、洪涝现象。

参考文献（References）

[1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[M/OL]. [2021-08-01]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC AR6 GI Full_Report.pdf.

[2] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. Science, 2006, 314(5804): 1442-1445.

[3] Griffiths M L, Bradley R S. Variations of twentieth-century temperature and precipitation extreme indicators in the northeast United States[J]. Physical Review B, 2007, 20: 5401-5417.

[4] Cinco T A, Guzman R G, Hilario F D. Long-term trends and extremes in observed daily precipitation and near surface air temperature in the Philippines for the period 1951—2010[J]. Atmospheric Research, 2014, 145-146: 12-26.

[5] 黄鑫, 焦黎, 马晓飞, 等. 基于RClimDex模型的近60 a中亚极端降水事件变化特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1039-1051. [Huang Xin, Jiao Li, Ma Xiaofei, et al. Change characteristics of extreme precipitation events in Central Asia in recent 60 years based on RClimDex model[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1039-1051.]

[6] 温煜华, 吕越敏, 李宗省. 近60 a祁连山极端降水变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1999-1212. [Wen Yuhua, Lü Yuemin, Li Zongxing. Changes of extreme precipitation in Qilian Mountains in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1999-1212.]

[7] 赵一飞, 邹欣庆, 张勃, 等. 黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1325-1332. [Zhao Yifei, Zou Xinqing, Zhang Bo, et al. Precipitation variation in association with climate indices in Loess Plateau of Gansu Province, northwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1325-1332.]

[8] Whan K, Zwiers F. The impact of ENSO and the NAO on extreme winter precipitation in North America in observations and regional climate models[J]. Climate Dynamics, 2017, 48(5-6): 1401-1411.

[9] Gao T, Wang H J, Zhou T. Changes of extreme precipitation and nonlinear influence of climate variables over monsoon region in China[J]. Atmospheric Research, 2017, 197: 379-389.

[10] 李湘瑞, 范可, 徐志清. 2000年后中国北方东部地区夏季极端降水减少及水汽输送特征[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 1109-1124. [Li Xiangrui, Fan ke, Xu Zhiqing. Decrease in extreme precipitation in summer over east northern China and the water-vapor transport characteristics after year 2000[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(5): 1109-1124.]

[11] Ii M Q V, Matsumoto J. Significant influences of global mean temperature and ENSO on extreme rainfall in Southeast Asia[J]. Journal of Climate, 2015, 28(5): 1905-1919.

[12] 武文博, 游庆龙, 王岱, 等. 中国东部夏季极端降水事件及大气环流异常分析[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(1): 47-58. [Wu Wenbo, You Qinglong, Wang Dai, et al. Characteristics of extreme precipitation and associated anomalous circulations over eastern China during boreal summer[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(1): 47-58.]

[13] 申乐琳, 何金海, 周秀骥, 等. 近50年来中国夏季降水及水汽输送特征研究[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 918-931. [Shen Lelin, He Jinhai, Zhou Xiuji, et al. The reginoal variabilities of the summer rainfall in China and its relation with anomalous moisture transport during the recent 50 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(6): 918-931.]

[14] 张勇, 杨春瑰, 唐卫亚. 长江中下游1-5月降水分布型及其成因[J]. 大气科学学报, 2015, 38(1): 111-119. [Zhang Yong, Yang Chungui, Tang Weiya. Precipitation patterns in the middle and low reaches of Yangtze River during January-May and their causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 38(1): 111-119.]

[15] 吴舒祺, 赵文吉, 杨阳, 等. 基于小波变换的长江中下游地区极端降水与大气环流响应关系研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(4): 67-77. [Wu Shuqi, Zhao Wenji, Yang Yang, et al. Response of extreme precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin to the atmospheric circulation based on continuous wavelet transform[J]. Journal of Water Re-

sources and Water Engineering, 2021, 32(4): 67-77.]

[16] 佘敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210. [She Dunxian, Xia Jun, Zhang Yongyong, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River Basin in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1200-1210.]

[17] 王昊, 姜超, 王鹤松, 等. 中国西南部区域雨季极端降水指数时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2019, 40(1): 1-14. [Wang Hao, Jiang Chao, Wang Hesong, et al. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in southwestern China in the rainy season[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(1): 1-14.]

[18] 王莉萍, 王维国, 张建忠. 我国主要流域降水过程时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 161-173. [Wang Liping, Wang Weiguo, Zhang Jianzhong. Spatial and temporal distribution of precipitation processes in major river basins in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 161-173.]

[19] 陈星任, 杨岳, 何佳男, 等. 近60年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2068-2081. [Chen Xingren, Yang Yue, He Jianan, et al. Spatiotemporal change of persistent extreme precipitation and the associated circulation causes over China in the last 60 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(9): 2068-2081.]

[20] 邹磊, 余江游, 王飞宇, 等. 渭河流域极端降水时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 764-774. [Zou Lei, Yu Jiangyou, Wang Feiyu, et al. Spatial-temporal variations of extreme precipitation indices and their response to atmospheric circulation factors in the Weihe River Basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 764-774.]

[21] 丁莹莹, 邱德勋, 吴常雪, 等. 关中平原极端降水时空变化及其与大气环流的关系应[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 104-112. [Ding Yingying, Qiu Dexun, Wu Changxue, et al. Spatial-temporal variations in extreme precipitation and their relationship with atmospheric circulation in the Guanzhong Plain[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 104-112.]

[22] 曹永旺, 延军平. 1961—2013年山西省极端气候事件时空演变特征[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 2086-2098. [Cao Yongwang, Yan Junping. Temporal and spatial analysis of extreme climatic events in Shanxi Province from 1961 to 2013[J]. Resources Science, 2015, 37(10): 2086-2098.]

[23] 董伯纲, 于洋. 近60年山西省极端降水时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 135-141. [Dong Bogang, Yu Yang. Tempo-spatial variation characteristics of extreme precipitation in Shanxi Province in recent 60 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 135-141.]

[24] 戎晓庆, 庞奖励, 韩军青. 山西省1958—2012年旱涝灾害分布趋势及气候背景研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 97-102. [Rong Xiaoqing, Pang Jiangli, Han Junqing. Distribution trends of drought and flood disasters and climate background from 1958 to 2012 in Shanxi Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(9): 97-102.]

[25] 张春林, 牛景波, 牛俊杰. 山西黄土高原近50年来气候暖干化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 70-74. [Zhang Chunlin, Niu Jingbo, Niu Junjie. Study on warming and drying climate of Shanxi Loss Plateau in recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 70-74.]

[26] 山西省地方志编撰委员会办公室. 山西通志气象志[M]. 北京: 中华书局, 1999: 82-86. [Shanxi Provincial Local Chronicles Compilation Committee Office. Meteorological records of Shanxi[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 1999: 82-86.]

[27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第二版. 北京: 气象出版社, 2007: 63-66. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 63-66.]

[28] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2012: 289-292. [Tang Guoan, Yang Xin. ArcGIS spatial analysis experiment course[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012: 289-292.]

[29] 王霞, 吴加学. 基于小波变换的西、北江水沙关系特征分析[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(1): 21-28. [Wang Xia, Wu Jiaxue. Wavelet analyses of rating curves in Xijiang and Beijiang Rivers[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(1): 21-28.]

[30] Tan X, Gan T Y, Shao D. Wavelet analysis of precipitation extremes over Canadian ecoregions and teleconnections to largescale climate anomalies[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121: 469-486.

[31] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11: 561-566.

[32] Lin Q, Wu Z, Singh V P, et al. Correlation between hydrological drought, climatic factors, reservoir operation, and vegetation cover in the Xijiang Basin, south China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 512-524.

[33] 邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 22-26, 42. [Shao Jun. Multi-scale correlation analysis of hydrological time series based on cross wavelet transform[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2013, 32(2): 22-26, 42.]

[34] 蔡霞, 蔡琳, 李亚军, 等. 山西北部极端气候事件与农业气象灾害分析[J]. 江西农业学报, 2023, 35(2): 121-127. [Cai Xia, Cai Lin, Li Yajun, et al. Analysis of extreme climatic events and agrometeorological disasters in northern Shanxi Province[J]. Journal of Jiangxi Agricultural Sciences, 2023, 35(2): 121-127.]

Temporal and spatial evolution of extreme precipitation and its response to atmospheric circulation factors in northern Shanxi Province

CAI Xia[1], LIANG Guihua[2], ZHANG Dongfeng[3], CAI Lin[4], BAI Ying[5], LI Ruifeng[6]

(1. Shuozhou Meteorological Bureau of Shanxi Province, Shuozhou 036002, Shanxi, China; 2. Shuocheng Meteorological Bureau, Shuozhou City, Shanxi Province, Shuozhou 036002, Shanxi, China; 3. Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 4. Heze University, Shandong Province, Heze 274000, Shandong, China; 5. Handan Meteorological Bureau, Handan 056001, Hebei, China; 6. Pinglu Meteorological Bureau, Shuozhou City, Shanxi Province, Shuozhou 036002, Shanxi, China)

Abstract: Based on daily precipitation data from 28 national meteorological stations in northern Shanxi Province, China, from 1972 to 2020, temporal and spatial changes in extreme precipitation in northern Shanxi and their correlation with atmospheric circulation factors and periodic characteristics were studied using linear regression, Pearson correlation analysis, continuous wavelet analysis, and cross wavelet transform analysis. The results show the following: (1) In terms of time, the eight extreme precipitation indices in northern Shanxi increased significantly in the late 1970s and from the late 2010s to the early 2000s: annual total wet-day precipitation (PRCPTOT), number of heavy precipitation days (R10mm), soaked days (R95P), extremely wet days (R99P), maximum 1-day precipitation amount (Rx1day), and maximum 5-day precipitation amount (Rx5day). The simple daily intensity index (SDII) increased significantly, and consecutive wet days (CWD) also increased slightly. Precipitation was unusually low throughout the 1980s. (2) Spatially, the extreme precipitation indices gradually increased from northeast to southwest. From the analysis of the stations' trend change, the extreme precipitation indices of most stations showed an upward trend, with the most significant upward trend of the stations located southwest of Xinzhou City. PRCPTOT and SDII in Shuozhou City and southeast of Xinzhou City showed an increasing trend. However, days of CWD showed a decreasing trend, indicating that the probability of extreme precipitation events in Shuozhou City and the southeast of Xinzhou City was high. (3) Through wavelet transform analysis, it was discovered that the extreme precipitation indices in northern Shanxi had a periodic feature of recurring in approximately 4 years in the past 30 years. Among the selected atmospheric circulation indices, the North Atlantic Oscillation Index (NAO) had the most obvious influence on extreme precipitation in northern Shanxi. The larger the NAO, the smaller the PRCPTOT, R10mm, R95p, R99p, Rx1day, Rx5day, and SDII, and the lower the CWD, the greater the probability of low rainfall and drought in northern Shanxi, which is prone to flash flooding. The research results can provide a scientific theoretical basis for the prevention of meteorological disasters in northern Shanxi.

Key words: extreme precipitation indices; spatiotemporal distribution; atmospheric circulation anomaly factor; wavelet analysis; northern Shanxi